

ロボカップ：中型ロボットリーグ

高橋 泰岳

1 はじめに

中型ロボットリーグ (F2000) は 1997 年に名古屋で開催された第一回ロボカップから行なわれてきた一番長い歴史を持つリーグの一つである。このリーグは他のリーグと比べロボット (50cm 四方に収まること) やフィールド (約卓球台九枚分) が大きいこと、グローバルビジョン方式を認めていないところが特徴となる。ほとんどのロボットが台車に制御用のコンピュータとビジョンシステムを備え、チームによってはレーザーレンジファインダ、赤外線近接センサ等を装備しており、基本的に単体で自律的に動くことが基本となるが、チームメイト間やフィールドの外に設置されたコーチサーバと情報を共有し、中央集権的なチーム全体の制御も許されている。

第 6 回ロボカップが先日 2002 年 6 月に福岡ドームで開催され、中型ロボットリーグでは世界から 16 チーム (日本 8, ドイツ 3, イラン 2, オランダ 1, イタリア 1, スウェーデン 1) 参加した。大会は前回同様に予選リーグと決勝トーナメントに分けて行われた。予選リーグでは 16 チームを二リーグに分け、その中で総当たり戦を行った。決勝リーグにはそれぞれのリーグから上位 4 チームが出場し、優勝を争った。

決勝トーナメントの結果は、優勝が EIGEN(慶応大学)、準優勝は WinKIT(金沢工業大学)、3 位は Osaka Univ. Trackies 2002 (大阪大学)、そして 4 位は GMD-Musashi(ドイツ国立情報処理研究所,九州工業大,北九州大,レチェ大 合同チーム)であった。GMD-Musashi は Technical Challenges において優秀な成績を収めたため、RSJ award を獲得している。Technical Challenges では、各チーム 1 台のロボットにボールをドリブルしながら 2 本のボールの間をぬってシュートを決めるタスクを与え、その達成時間の長短によって、ロボット単体の性能を評価し、さらに各チーム複数台のロボットに自由な協調動作をさせ、協調行動の達成性能も評価した。詳しい試合結果については RoboCup2002 のウェブページ [1] を御覧頂きたい。

本稿ではそれぞれのチームがこのロボカップに参加するなかで取り組んでいる研究事例をいくつか簡単に紹介していきたい。ロボカップに関連する研究は中型



Fig.1 RoboCup2002 中型ロボットリーグ試合の様子

リーグに参加しているチームの研究に限っても多岐に渡るので、すべてを網羅するのは非常に難しい。中型ロボットリーグでは、オンボードビジョンシステムでの実時間画像処理、自己位置同定、移動機構の開発などの研究が活発であるが、一方で各ロボットのスキルの実現/獲得やチーム内での協調行動の実現/獲得/創発等の研究も精力的に行なわれている。本報告では後の二つの話題に重点をおいて簡単に紹介していきたい。

2 ロボットのスキルの実現

2.1 単純動作の組み合わせによる行動設計

南カルフォルニア大学の Spirit of Bolivia チーム [2] はボールに直進する、ボールを左/右に見ながら周回する、ボールを探すという動作をセンサ (画像)・アクチュエータ間のマッピングを記述する簡単な表を作ることによって実現し、状況に応じてこの動作を切替えることで、ロボットの一連の行動を実現している (Fig.2)。

イン法 [11] と関数近似に基づくオンライン法 [12] を開発している (Fig.4) .

2.4.3 階層型学習機構

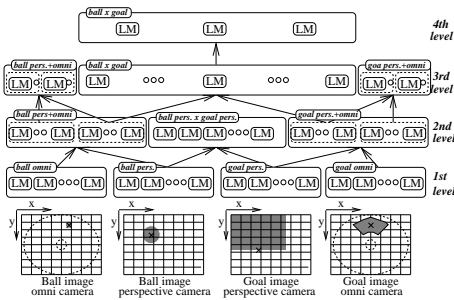


Fig.5 視覚に基づく行動獲得のための階層型学習機構

大阪大学 Trackies[13] では同一構造の学習器を複数使い、これを階層的に自律的に構築することによる行動獲得手法を提案し、実機による実験を通してその有効性を確認している。また、全状態行動空間を部分空間に分け高いレベルで全体の統合を行うことで、多種多様な論理センサ・アクチュエータを装備したロボットによる学習を行う手法を提案し、サッカーロボットによるシュート行動に適用することで有効性を確認している [14](Fig.5) .

ドイツ CS Freiburg チーム [15] においても階層型学習機構 (Multi-Layered Reinforcement Learning) に取り組んでいる。彼らの階層構造はより人間にわかりやすく設計者が構築している。つまり、Stone and Veloso[16] が提案しているように、下位の学習器にプレイヤーの基本的なスキル (shootGoal, shootAway, dribbleBall, searchBall, turnBall, approachBall, freeFromStall) を獲得させ、上位の学習器が状況に応じたスキルの選択を学習する。上位の学習器と下位の学習器が同時に学習を進める方が、上位と下位を別々に学習させるよりも良い性能を示すという、非常に興味深い実験結果を示している。

2.5 進化的手法を用いた行動獲得

進化的手法を用い協調行動を獲得する研究も行なわれている。多目的な評価値に基づいて行動を評価する際、評価間のバランスが重要になる。大阪大学 Trackies[17] では個体集合の評価値の分布に応じて複数の評価値の重み付けを適応的に変更する枠組を提案している。また慶応大学の EIGEN チーム [18] では、環境情報と他

のロボットから送信された情報から複数の行動パターンへの写像をニューラルネットワークで表現し、重みを遺伝的アルゴリズムを用いて学習させ、状況に応じて適切な行動を獲得させることで、複数ロボット間で動的な役割分担を行なわれることを示している。

2.6 センサフュージョンによるフィールド上状況認識

平山ら [19] はファジィ認知マップを用いてロボットに搭載された CCD カメラ、赤外線センサ、接触スイッチ等の複数のセンサによる局所的情報からロボット自身の絶対位置、味方の相対位置、ボールの相対位置をそれぞれ想起し、フィールド全体の状況を再構成する手法を提案している。

3 マルチエージェント環境での協調行動

3.1 通信を用いた協調行動

宇都宮大学・東洋大学・理化学研究所の合同チームである UTTORI United. チームでは明示的な通信を用いたパス行動の実現を行なっている。例えば文献 [20, 21] では、フィールドを複数のエリアに分け、ボールを持ったロボットがどのエリアにボールを蹴りたいかを他のロボットたちに伝え、それぞれのロボットが自分のいるエリアと受け取れるかどうかの情報を返し、ボールを持ったロボットがパスを出すロボットを選択するという方法で協調行動を実現している。文献 [22, 23] では具体例 (協調的な攻撃、守備、パス、分散センシング) をいくつか挙げ、それらに対する通信の手続きを記述している (Fig.6) .

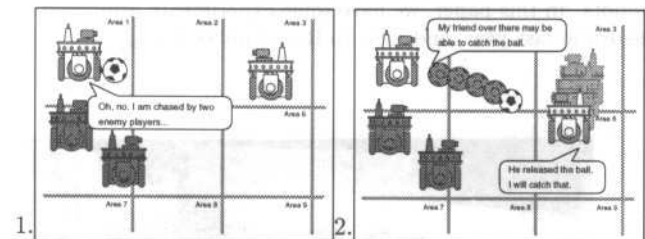


Fig.6 UTTORI United チームによるパス行動

イタリアの ART チーム [24, 25] においても通信を用いた動的な役割分担を実現している。各ロボットそれぞれにいくつかの役割と任意の状況に置けるその役割

の価値関数をあらかじめ設計しておく．基本となる無線通信機能が装備され，これを用いて各自が置かれている状況におけるそれぞれの役割の価値を全チームメイトに送信する．一番大きな価値を持つ役割を対応するロボットに割り当て，その役割をリストから除き，次に大きな価値を持つ役割をそれに対応するロボットに割り当てるという作業を繰り返すことで，チームメイト全員に役割を割り当てている．ゴールキーパとそれ以外のプレイヤーの間で密な通信を行ない，ゴールキーパの視覚システムが故障した場合でも，他のプレイヤーによる視覚情報を用いてタスクを遂行する例や，ゴールキーパの異常が見つかった場合，他のプレイヤーが自動的にディフェンスにまわる例，ゴールキーパから他のプレイヤーに指示を出し，相手のパスをカットする位置に移動，またはボールの進行方向を邪魔しないように移動させる例など，実機によって実現している．

大阪大学 Trackies[26] においても複数のタスクを動的にロボットに割り当てる手法を開発している．具体的には，各タスクの達成状況をロボット間で共有することにより，各ロボットが同時に達成できるタスクを自律的に選択するための枠組を提案している (Fig.7) ．

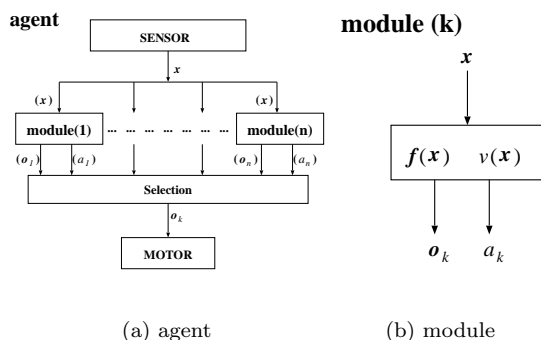


Fig.7 マルチモジュール干渉検出機構

3.2 マルチエージェント環境下における協調行動の獲得

マルチエージェント環境下において強化学習をロボットに適用する場合，通常，学習者以外のエージェントの行動/政策は固定，もしくは非常にゆっくりと変化するという仮定をおいていた．これは学習者から見て状態遷移確率が一定にみなせる環境でないといふと合目的な行動が強化学習により獲得できないからである．大阪大学 Trackies[27] では相手の行動/政策の切替えを状況の変化としてとらえ，それぞれの状況に対して学習器を割り当てる手法を提案している (Fig.8) ．

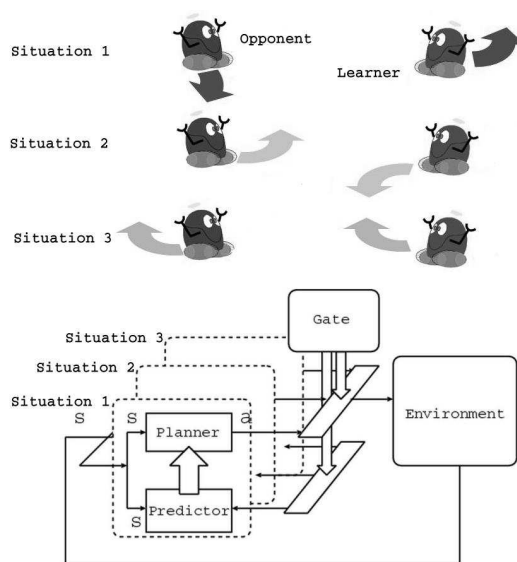


Fig.8 マルチエージェント環境下における行動生成のためのマルチモジュール学習機構

また，環境内に自律的に行動できるロボットが複数存在する場合，状態空間の構成そのものが困難となる．そこで，観測と行動のシーケンスから次元を含めた状態ベクトルを推定する手法を提案している [28] ．複数ロボットの同時学習として，進化的手法を用いて共進化による協調・競合行動の創発についての実験も行っている [29] ．このときロボットに与えられるタスクの適切な複雑さが効果的な共進化を誘導することについて議論している．

3.3 チーム戦略学習

大阪大学 Trackies チーム [30] はマルチエージェントシステムで敵味方に分かれ非常に動的な環境，ロボカップでよく見られるこの特徴的な環境において，ロボット同士で明示的な通信を行わない場合でも協調的動作が創発されることを実際の競技の中で示している．またこの知見をもとに，おのおの性格を持った選手の組合せを戦略と考え，監督の立場からゲーム進行状況から相手の戦略を推定し，相手に勝つ味方の戦略を推定する機構を提案している [31] ．

3.4 複数のパスプランニングの統合

ドイツの AGILO チーム [32] は単一のロボットのパスプランニング手法を複数 (Potential Field method, Shortest Path Method, Circumnavigating Obstacles,

and Maximizing the Clearance) 用意し, これらを統合して複数のロボットのナビゲーション計画に利用する手法を提案している. それぞれのパスプランニング手法はそれぞれ異なる仮定を必要とし, その利点と欠点を持つ. 状況に応じてそれらを切替えることで, 単一のパスプランニング手法のみのシステムよりも, より効率的に複数のロボットをナビゲーションできることを示している.

4 おわりに

本稿ではソフトコンピューティングよりな話題に重点をおいて紹介したが, 以上で紹介した内容以外にも様々な研究が活発に行なわれている. 試合で活躍するロボットは各チームの個性が出ていて見ているだけでも楽しい. 例えば, それぞれのチームのロボットの移動機構に限ってみても様々なものがある. どのような移動台車を使うかはそのチームの性格により大きく変わるが, 多くのチームはその手軽さから山彦や Nomad, Pioneer に代表されるような左右独立二輪型の台車を使うことが多い. しかし俊敏な動きが求められるロボカップでは即座に前後左右に移動できることが望ましい. そこでいくつかのチームは個性的な全方位移動型台車を開発している. オーストラリア RMIT の Raiders チーム [33] は台車に車輪ではなく 4 つのボールをつけ, 二つのボールに対し動力を伝えることにより全方位移動を実現している. UTTORI チーム [20, 34] は横方向に滑ることができる車輪を 4 方向に, またイタリア Golem チーム [35] や金沢工業大学の WinKIT 2002 [36] は 3 方向に設置することで実現している. イラン SharifCE チーム [37] は左右独立二輪を採用しているが, その動力輪を垂直軸回りに回転させることによる全方位移動機構を実現している.

また, どのようなセンサを用いて環境の認識を行なうかにもチームによっても特色が出ている. 例えば, 多くのチームはカメラ画像に何らかの画像処理を行ない, 自己位置同定や物体認識を行なうが, 通常のカメラでは広角レンズをつけても画角が狭いため, 動的に変化する環境を幅広く認識することが難しい. そこで全方位ミラーを搭載し, 360 度の視野を確保するチームが近年多くなった. その中でドイツをはじめとする合同チームの GMD-Musashi チーム [38] はカメラを回転させることで視野の狭さを補っている. ドイツ CS-Freiburg チーム [39] らはカメラ以外にレーザレンジファインダを使い, 正確な自己位置同定を行なっている.

はじめにでも書いたように, 中型ロボトリグは

第一回ロボカップから行なわれてきた一番長い歴史を持つリーグの一つである. 毎年, 少しずつであるが試合のレベルが確実に上がってきている. 今年からヒューマノイドリーグが始まったこともあり, 今後どのような方向にこの中型ロボトリグを発展させていくべきか, 議論がされているところである. 最後にロボカップ国際委員会, 各チームメンバー, ボランティアをはじめとする大会に関わって下さった皆様方に感謝します.

参考文献

- [1] RoboCup Federation. Robocup2002. <http://www.robocup2002.org>, June 2002.
- [2] Barry Brian Werger with team members Pablo Funes, Miguel Schneider-Fontán, Randy Sargent, Carl Witty, and Tim Witty. The spirit of bolivia: Complex behavior through minimal control. In Hiroaki Kitano, editor, *RoboCup-97: Robot Soccer World Cup I*, pp. 348–356. Springer, 1997.
- [3] Brune D. Damas, Pedro U. Lima, and Luis M. Custódio. A modified potential fields method for robot navigation applied to dribbling in robotic soccer. In Gal A. Kaminka, Pedro U. Lima, and Raul Rojas, editors, *The 2002 International RoboCup Symposium Pre-Proceedings*, pp. CD-ROM 58–71, June 2002.
- [4] M. Asada, S. Noda, S. Tawaratumida, and K. Hosoda. Purposive behavior acquisition for a real robot by vision-based reinforcement learning. *Machine Learning*, Vol. 23, pp. 279–303, 1996.
- [5] 加藤, 鈴木, 浅田. 強化学習によるゴール守備行動の獲得. 第 3 回 JSME ロボメカ・シンポジウム講演論文集, pp. 37–40, 1998.
- [6] C. J. C. H. Watkins and P. Dayan. “Technical note: Q-learning”. *Machine Learning*, Vol. 8, pp. 279–292, 1992.
- [7] Yasutake Takahashi, Masanori Takeda, and Minoru Asada. Improvement continuous valued q-learning and its application to vision guided behavior acquisition. In *The Fourth International Workshop on RoboCup*, pp. 255–260, 2000.
- [8] Shuichi ENOKIDA, Takeshi OHASHI, Takaichi YOSHIDA, and Toshiaki EJIMA. Extended q-learning: Reinforcement learning using self-organized state space. In Peter Stone, Tucker Balch, and Gerhard Kraetzschmar, editors, *RoboCup 2000: RoboSoccer World Cup IV*, pp. 129–138. Springer, 2001.
- [9] 内部, 浅田, 野田, 細田. 視覚に基づく強化学習による移動ロボットの多重タスク遂行のための協調行動の獲得. 第 21 回 人工知能基礎論研究会 (SIG-FAI-9403), pp. 25–32, 1995.
- [10] 榎田修一, 河野宗一, 大橋健, 江島俊朗. センサ空間の拡大を用いた eq-学習. 第 19 回日本ロボット学会学術講演会, pp. 85–86, 2001.
- [11] 浅田, 野田, 細田. ロボットの行動獲得のための状態空間の自律的構成. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 6, pp. 886–892, 1997.
- [12] 高橋泰岳, 浅田稔. 実ロボットによる行動学習のための状態空間の漸次的構成. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 1, pp. 118–124, 1999.
- [13] 高橋泰岳, 浅田稔. 複数の学習器の階層的構築による行動獲得. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 7, pp. 1040–1046, 2000.
- [14] Y. Takahashi and M. Asada. Multi-controller fusion in multi-layered reinforcement learning. In *International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI2001)*, pp. 7–12, 2001.

- [15] Alexander Kleiner, Markus Dietl, and Bernhard Nebel. Towards a life-long learning soccer agent. In Gal A. Kaminka, Pedro U. Lima, and Raul Rojas, editors, *The 2002 International RoboCup Symposium Pre-Proceedings*, pp. CD-ROM, June 2002.
- [16] Peter Stone and Mamuela Veloso. Layered approach to learning client behaviors in the robocup soccer server. *Applied Artificial Intelligence*, Vol. 12, No. 2-3, 1998.
- [17] Eiji Uchibe, Masakazu Yanase, and Minoru Asada. Behavior generation for a mobile robot based on the adaptive fitness function. In *Proc. of Intelligent Autonomous Systems (IAS-6)*, pp. 3-10, 2000.
- [18] 向後潤一, 藤井飛光, 吉田和夫. 協調行動を考慮したサッカーロボットの行動選択インテグレーションの設計手法. 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会 予稿集, pp. CD-ROM 1B38, 2002.
- [19] 平山健一郎, 橋本智己, 山口亨. センサフュージョンによる空間の再構成. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集, pp. CD-ROM 2P1-24-001, 1999.
- [20] K. Yokota, K. Ozaki, A. Matsumoto, K. Kawabata, H. Kaetsu, and H. Asama. Omni-directional autonomous robots cooperating for team play. In Hiroaki Kitano, editor, *RoboCup-97: Robot Soccer World Cup I*, pp. 333-347. Springer, 1997.
- [21] 川端邦明, 善林正春, 鈴木隆敏, 横田和隆, 尾崎功一, 松元明弘, 浅間一, 嘉悦早人, 遠藤勲. 全方向移動ロボットによる協調サッカープレイ. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, pp. CD-ROM 1AIII4-4, 1998.
- [22] K. Yokota, K. Ozaki, N. Watanabe, A. Matsumoto, D. Koyama, T. Ishikawa, K. Kawabata, H. Kaetsu, and H. Asama. Cooperative team play based on communication. In Minoru Asada, editor, *RoboCup-98: Robot Soccer World Cup II*, pp. 491-496, 1998.
- [23] 川端邦明, 鈴木剛, 横田和隆, 松元明弘, 嘉悦早人, 浅間一, 尾崎功一, Uttori United-2002. 通信に基づいた全方向移動ロボットのサッカープレイ: Uttori united 2002. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集, pp. CD-ROM 1P1-C10, 2002.
- [24] Claudio Castelpietra, Luca Iocchi, Daniel Nardi, Maurizio Piaggio, Alessandro Scalzo, and Antonio Sgorbissa. Communication and coordination among heterogeneous mid-size players: Art99. In Peter Stone, Tucker Balch, and Gerhard Kraetzschmar, editors, *RoboCup 2000: Robot Soccer World Cup IV*, pp. 86-95. Springer, 2001.
- [25] Giovanni Adorni, Stefano Cagnoni, Monica Mordonini, and Maurizio Piaggio. Team/goal-keeper coordination in the robocup mid-size league. In Peter Stone, Tucker Balch, and Gerhard Kraetzschmar, editors, *RoboCup 2000: Robot Soccer World Cup IV*, pp. 279-284. Springer, 2001.
- [26] Eiji Uchibe, Tatsunori Kato, Minoru Asada, and Koh Hosoda. Dynamic task assignment in a multi-agent/multitask environment based on module conflict resolution. In *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3987-3992, 2001.
- [27] Yasutake Takahashi, Kazuhiro Edazawa, and Minoru Asada. Behavior acquisition based on multi-module learning system in multi-agent environment. In Gal A. Kaminka, Pedro U. Lima, and Raul Rojas, editors, *The 2002 International RoboCup Symposium Pre-Proceedings*, pp. CD-ROM 404-411, June 2002.
- [28] M. Asada, E. Uchibe, and K. Hosoda. Cooperative behavior acquisition for mobile robots in dynamically changing real worlds via vision-based reinforcement learning and development. *Artificial Intelligence*, Vol. 110, pp. 275-292, 1999.
- [29] 内部英治, 浅田稔, 中村理輝. 共進化によるマルチ移動ロボット環境における協調行動の獲得. 遺伝的アルゴリズム 4, 第 7 章, pp. 193-220. 産業図書, 2000.
- [30] Yasutake Takahashi, Takashi Tamura, and Minoru Asada. Cooperation via environmental dynamics caused by multi robots in a hostile environment. In *The Fourth IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*, pp. 413-418, September 2001.
- [31] Yasutake Takahashi, Takashi Tamura, and Minoru Asada. Strategy learning for a team in adversary environments. In *RoboCup 2001 book*, p. (to appear), 2001.
- [32] Sebastian Buck, Michael Beetz, and Thorsten Schmitt. Planning and executing joint navigation tasks in autonomous robot soccer. In Andreas Birk, Silvia Coradeschi, and Satoshi Tadokoro, editors, *The RoboCup2001 International Symposium*, p. to be appeared, 2001.
- [33] Andrew Price, Andrew Jennings, and John Kneen. Robocup97: An omni-directional perspective. In Hiroaki Kitano, editor, *RoboCup-97: Robot Soccer World Cup I*, pp. 320-332. Springer, 1997.
- [34] 川端邦明, 岡田和朗, 尾崎功一, 浅間一, 嘉悦早人, 遠藤勲. Robocup 中型リーグ用全方向移動ロボットプラットフォームの開発. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集, pp. CD-ROM 2P1-24-005, 1999.
- [35] Paolo de Pascalis, Massimo Ferrareso, Mattia Lorenzetti, Alessandro Modolo, Matteo Peluso, Roberto Polesel Robert Rosati, Nikita Scattolin, Alberto Speranzon, and Walter Zanette. Golem team in middle-sized robots league. In Peter Stone, Tucker Balch, and Gerhard Kraetzschmar, editors, *RoboCup 2000: Robot Soccer World Cup IV*, pp. 603-606. Springer, 2001.
- [36] Kengo Yamane, Kenichi Abe, Takatugu Matumura, Toshihiro Matukawa, Naruhito Ozawa, Yasuki Asano, and Kosei Demura. Winkit 2002: Team description. In Gal A. Kaminka, Pedro U. Lima, and Raul Rojas, editors, *The 2002 International RoboCup Symposium Pre-Proceedings*, pp. CD-ROM 501, 2002.
- [37] M. Jamzad, A. Foroughnassiraei, E. Chiniforooshan, R. Ghorbani, M. Kazemi, H. Chitsaz, F. Mobasser, and S. B. Sadjad. Middle sized soccer robots: Arvand. In Manuera Veloso, Enrico Pagello, and Hiroaki Kitano, editors, *RoboCup-99: Robot Soccer World Cup III*, pp. 61-73. Springer, 1999.
- [38] Gmd-musashi. <http://www.gmd-musashi.com/>.
- [39] Cs-freiburg. <http://www.informatik.uni-freiburg.de/robocup/>.